

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360150  
 研究課題名 (和文) 誘導ブリルアン散乱特性を考慮したホーリーファイバの性能評価法の確立とその応用  
 研究課題名 (英文) A Method for Evaluating Figure of Merit in Holey Fibers Considering Stimulated Brillouin Scattering Characteristics and Its Applications  
 研究代表者  
 小柴 正則 (KOSHIBA MASANORI)  
 北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
 研究者番号：40101521

研究成果の概要：コア径の異なる 4 種類のホーリーファイバ (フォトニック結晶ファイバ) の誘導ブリルアン散乱利得とパワーしきい値のコア径ならびに波長依存性を、有限要素法に基づく理論と実験の両面から調査し、ホーリーファイバの誘導ブリルアン散乱パワーしきい値が、コア径が等しい従来型高非線形ファイバに比べて大きくなること、誘導ブリルアン散乱利得スペクトルに現れる複数のピークと光学モードならびに音響モードとの間の関係を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：ホーリーファイバ、フォトニック結晶ファイバ、高非線形ファイバ、光学モード、音響モード、有限要素法、誘導ブリルアン散乱利得、誘導ブリルアン散乱パワーしきい値

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ホーリーファイバ (Holey Fiber: HF) と呼ばれる新構造の光ファイバの研究開発が急速な勢いで進展している。HF は、シリカガラス中に空孔を周期的に配列して構成されるため、フォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber: PCF) と呼ばれることもある。このような HF は、シリカガラスと空孔との大きな屈折率差のために、通常の光ファイバでは実現不可能な波長分散特性や非線形特性を発現する。特に、HF の高非線形性を利用したスーパーコンティニューム光発生や波長変換デバイスの高性能化

等、HF による高非線形ファイバ型光デバイスの開発が活発化している。

(2) 研究代表者らのグループは、HF の新しい群速度分散制御法 (Optics Express, Vol. 11, pp. 843-852, 2003) や分散特性を最適化した高非線形 HF の実現法 (Optics Express, Vol. 12, pp. 2027-2032, 2004; Optics Express, Vol. 13, pp. 8365-8371, 2005) の開発を通じて、HF 型高非線形光デバイスの研究を進めてきた。最近では、シリカガラスのみならず、テルライトガラス、ビスマスガラス、鉛系ガラス等、非線形係数の非常に大きなガラス材料にも注目が集まっている。

## 2. 研究の目的

(1) 高非線形ファイバに入射する光パワーが大きくなると、誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering: SBS) によって光パワーに入力限界が生じる。したがって、HF の性能指数 (Figure of Merit: FOM) を正確に見積もるためには、非線形係数やファイバ損失のみならず、SBS による入射光パワーの制限を考慮する必要があり、まず、複雑な断面を有する HF の SBS 利得スペクトルや SBS パワーしきい値を高精度かつ高速に算出できる理論を構築する。

(2) SBS による特性劣化を考慮した FOM を評価するとともに、高非線形 HF の FOM 最大化に係る設計指針を得るため、HF の構造パラメータと SBS 利得スペクトルとの関係を詳細に調査し、高 SBS パワーしきい値と高非線形性を兼ね備えた HF の構造ならびに構成材料を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) HF の SBS 特性を正確に見積もるには、HF 中に存在するすべての音響モードを高精度に算出する必要がある。ここでは、研究代表者らのグループが独自に開発を進めてきた HF の光学モード解析のためのベクトル有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を、音響モードも高精度に算出できる解析ツールへと拡張させる。

(2) FEM によって算出された光学モードと音響モードとの重なり積分を利用して HF の SBS 利得スペクトル評価のための理論を開発する。具体的には、任意の屈折率分布ならびに任意の断面構造を有する光ファイバに適用可能な SBS 利得スペクトルと SBS パワーしきい値とを関係付けるための新たな理論を開発する。

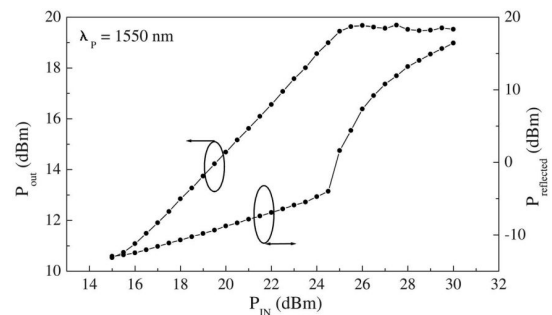
(3) HF の SBS パワーしきい値とファイバ構造ならびにファイバ材料との関係を詳細に調査し、ファイバ構造としきい値との関係を明らかにする。HF の SBS 利得スペクトルは、従来型の高非線形ファイバと大きく異なっているが、その原因を明らかにするとともに、大きな SBS パワーしきい値を有する高非線形 HF の設計指針を示す。

## 4. 研究成果

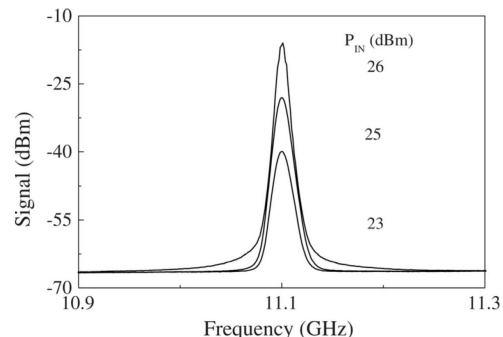
(1) コア径の異なる 4 種類 of HF の SBS 散乱利得とパワーしきい値を理論的、実験的に調査したが、ここでは、研究代表者らの論文 (Journal of Optical Society of America B, Vol. 25, pp. 582-593, 2008) に基づいて、RB61 ファイバ (コア直径  $8.0\ \mu\text{m}$ 、空孔ピッチ  $4.9\ \mu\text{m}$ 、空孔直径  $1.85\ \mu\text{m}$ 、空孔リング数 5、以後 RB61 と略す)、RB65 ファイバ (コア直径  $3.55\ \mu\text{m}$ 、空孔ピッチ  $2.35\ \mu\text{m}$ 、空孔直径  $1.15\ \mu\text{m}$ 、空孔リング数 6、以後 RB65

と略す)、Crystal Fiber (コア直径  $1.7\ \mu\text{m}$ 、空孔ピッチ  $1.2\ \mu\text{m}$ 、空孔直径  $0.72\ \mu\text{m}$ 、空孔リング数 10、以後 CF と略す) の 3 種類の HF の SBS 特性について述べる。なお、ポンプ光波長は、いずれも  $1550\ \text{nm}$  である。

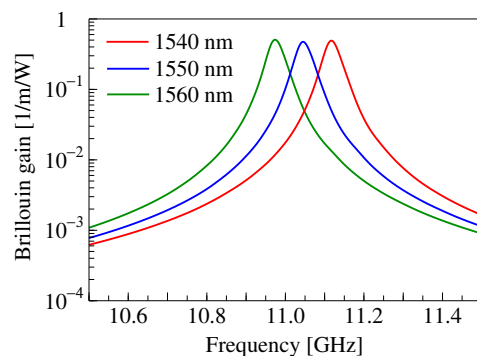
(2) RB61: 図 1(a)、(b)に、それぞれ透過・反射パワー、ブリルアンスペクトルの実験結果を示す。透過・反射パワーは、SBS パワーしきい値  $25\ \text{dBm}$  (校正値は  $21.75\ \text{dBm}$ ) まで、ほぼ線形に増大している。ブリルアンシフト  $11.1\ \text{GHz}$  において単一のピークが観測される。これは、RB61 のコアが大きいため、音響縦モードがコア領域に閉じ込められ、これが光学モードと結合することによるものである。図 3(c)はブリルアンスペクトルの計算結果を示したものであり、実験結果とよく一致している。



(a) 透過・反射パワー (実験値)



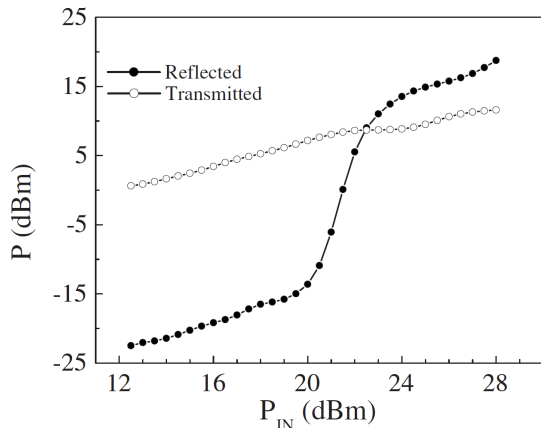
(b) ブリルアンスペクトル (実験値)



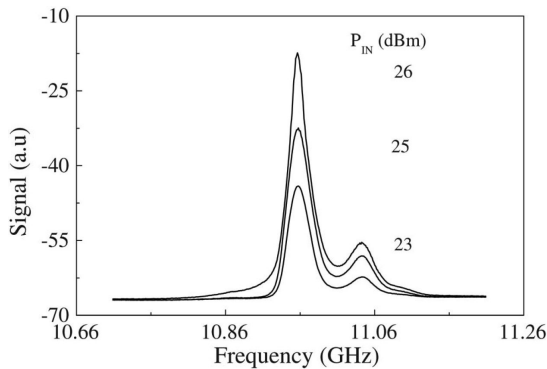
(c) ブリルアンスペクトル (理論値)

図 1 RB61 ファイバの SBS 特性

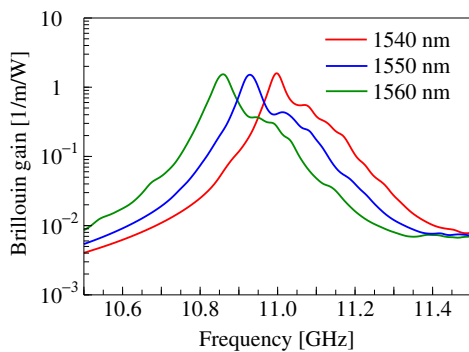
(3) RB65 : 図 2(a), (b)に、それぞれ透過・反射パワー、ブリルアンスペクトルの実験結果を示す。SBS パワーしきい値は 18 dBm(校正値)である。RB61 の場合とは異なり、ブリルアンスペクトルには近接した二つのピークが観測される。高周波側に現れる 2 番目のピークは、RB65 のコアが小さいため、ファイバ全体に広がった高次の音響モードが光学モードと結合することによるものである。図 3(c)はブリルアンスペクトルの計算結果を示したものであり、実験結果とよく一致している。



(a) 透過・反射パワー (実験値)



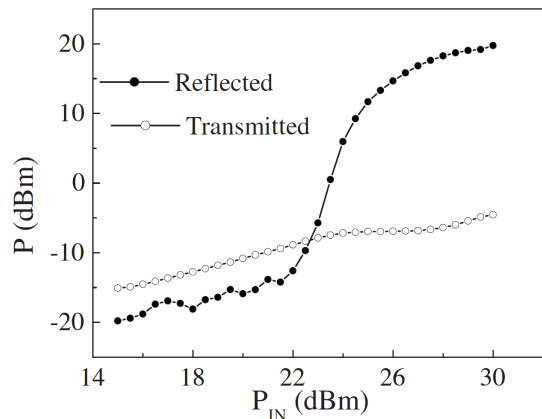
(b) ブリルアンスペクトル (実験値)



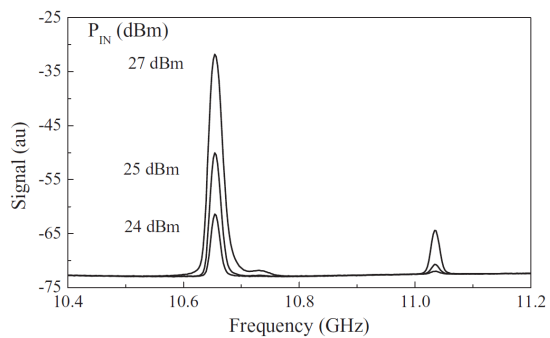
(c) ブリルアンスペクトル (理論値)

図 2 RB65 ファイバの SBS 特性

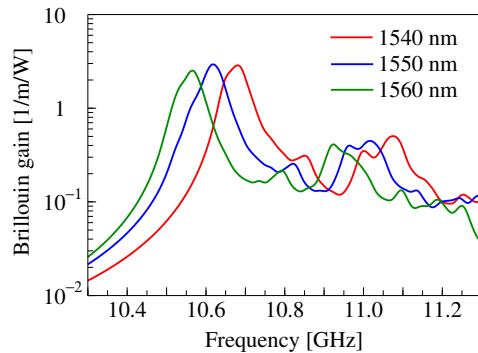
(4) CF : 図 3(a), (b)に、それぞれ透過・反射パワー、ブリルアンスペクトルの実験結果を示す。SBS パワーしきい値は 19~20 dBm(校正値)である。RB65 の場合と同様に、ブリルアンスペクトルには複数のピークが観測されるが、この場合、三つのピークが現れている。これは、このファイバのコアが最も小さいため、高次の音響モードが複数存在し、これらが光学モードと結合することによるものである。図 3(c)はブリルアンスペクトルの計算結果を示したものであり、実験結果とよく一致している。



(a) 透過・反射パワー (実験値)



(b) ブリルアンスペクトル (実験値)



(c) ブリルアンスペクトル (理論値)

図 3 Crystal Fiber の SBS 特性

(5) 本研究によって明らかになったことをまとめておく。

・HFのSBSしきい値は、コア径が等しい通常の単一モード光ファイバよりも大きい。

・コアサイズが小さくなると、SBSスペクトルに複数のピークが現れる。

・ Brillouin スペクトルに現れる第1、第2のピークに寄与する音響モードの音速は、それぞれシリカ中を伝搬する縦波、横波の速度に対応しており、3番目のピークに寄与する音響モードの音速は第1ピークから予想される速度よりも若干遅い。

・第2、第3ピークの Brillouin シフトは波長の逆数にほぼ比例するが、波長を無限大としたときの外挿値は零にはならない。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計16件)

- ① S.K. Varshney, K. Saitoh, K. Iizawa, Y. Tsuchida, M. Koshiba, and R.K. Sinha, Raman amplification characteristics of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> photonic crystal fibers, *Optics Letters*, Vol. 33, pp. 2431-2433, 2008 【査読有】
- ② Z. Varallyay, K. Saitoh, J. Fekete, K. Kakihara, M. Koshiba, and R. Szipocs, Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers for broadband dispersion control in femtosecond fiber lasers, *Optics Express*, Vol.16, pp. 15603-15616, 2008 【査読有】
- ③ M. Skorobogatiy, K. Saitoh, and M. Koshiba, Full-vectorial coupled mode theory for the evaluation of macro-bending loss in multimode fibers, application to the hollow-core photonic bandgap fibers, *Optics Express*, Vol. 16, pp. 14945-14953, 2008 【査読有】
- ④ Y. Tsuchida, K. Saitoh, and M. Koshiba, A design method for single-polarization holey fibers with improved beam quality factor, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, pp. 2162-2167, 2008 【査読有】
- ⑤ S.K. Varshney, K. Saitoh, N. Saitoh, Y. Tsuchida, M. Koshiba, and R.K. Sinha, Strategies for realizing photonic crystal fiber bandpass filters, *Optics Express*, Vol. 16, pp. 9459-9467, 2008 【査読有】
- ⑥ T. Mura0, K. Saitoh, and M. Koshiba, Structural optimization of air-guiding photonic bandgap fibers for realizing ultimate low loss waveguides, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, pp. 1602-1612, 2008 【査読有】
- ⑦ J.E. McElhenny, R.K. Pattnaik, J. Toulouse, K. Saitoh, and M. Koshiba, Unique characteristic features of stimulated Brillouin scattering in small-core photonic crystal fibers, *Journal of Optical Society of America B*, Vol. 25, pp. 582-593, 2008 【査読有】
- ⑧ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Tunable photonic crystal fiber couplers with a thermo-responsive liquid crystal resonator, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, pp. 663-669, 2008 【査読有】
- ⑨ K. Iizawa, S.K. Varshney, Y. Tsuchida, K. Saitoh, and M. Koshiba, Bend-insensitive lasing characteristics of single-mode, large-mode-area ytterbium-doped photonic crystal fiber, *Optics Express*, Vol. 16, pp. 679-591, 2008 【査読有】
- ⑩ S.K. Varshney, K. Sasaki, K. Saitoh, and M. Koshiba, Design and simulation of 1310 nm and 1480 nm single-mode photonic crystal fiber Raman lasers, *Optics Express*, Vol. 16, pp. 549-559, 2008 【査読有】
- ⑪ K. Saitoh, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Dispersion, birefringence, and amplification characteristics of newly designed dispersion compensating hole-assisted fibers, *Optics Express*, Vol. 15, pp. 17724-17735, 2007 【査読有】
- ⑫ K. Saitoh, N.J. Florous, T. Mura0, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Photonic bandgap fiber filter design based on nonproximity resonant coupling mechanism, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, pp. 1547-1549, 2007 【査読有】
- ⑬ K. Saitoh, N.J. Florous, T. Mura0, and M. Koshiba, Realistic design of large-hollow-core photonic band-gap fibers with suppressed higher order modes and surface modes, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, pp. 2440-2447, 2007 【査読有】
- ⑭ S.K. Varshney, N.J. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba, and T. Fujisawa, Numerical investigation and optimization of photonic crystal fiber for simultaneous dispersion compensation over S+C+L wavelength

- bands, *Optics Communications*, Vol. 274, pp. 74-79, 2007 【査読有】
- ⑮ S.K. Varshney, K. Saitoh, M. Koshiba, and P.J. Roberts, Analysis of a realistic and idealized dispersion compensating photonic crystal fiber Raman amplifier, *Optical Fiber Technology*, Vol. 13, pp. 174-179, 2007 【査読有】
- ⑯ T. Murao, K. Saitoh, N.J. Florous, and M. Koshiba, Design of effectively single-mode air-core photonic bandgap fiber with improved transmission characteristics for the realization of ultimate low loss waveguide, *Optics Express*, Vol. 15, pp. 4268-4280, 2007 【査読有】
- 〔学会発表〕 (計 20 件)
- ① Z. Varallyay, K. Saitoh, A. Szabo, K. Kakihara, M. Koshiba, and R. Szpocs, Reversed dispersion slope photonic bandgap fibers and femtosecond pulse propagation, *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2009)*, San Diego, California, USA, Mar. 26, 2009
- ② K. Saitoh, T. Taru, T. Nagashima, T. Murao, K. Maeda, T. Sasaki, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Control of transmission band in all-solid photonic bandgap fibers with novel hybridized bandgap structure, *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2009)*, San Diego, California, USA, Mar. 26, 2009
- ③ F. Poli, L. Vincetti, D. Passaro, A. Cucinotta, S. Selleri, L. Rosa, K. Saitoh, Y. Tsuchida, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Fundamental and high-order mode bending loss in leakage channel fibers, *European Conference on Optical Communication (ECOC 2008)*, Brussels, Belgium, Sept. 24, 2008
- ④ L. Rosa, K. Saitoh, Y. Tsuchida, S.K. Varshney, M. Koshiba, F. Poli, D. Passaro, A. Cucinotta, S. Selleri, and L. Vincetti, Single-mode large-mode-area leakage channel fibers with octagonal symmetry, *OSA Topical Meeting on Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications (IPNRA 2008)*, Boston, Massachusetts, USA, July 16, 2008
- ⑤ Y. Tsuchida, K. Saitoh, S.K. Varshney, L. Rosa, and M. Koshiba, Design of single-mode leakage channel fibers with large-mode-area and low bending loss, *Optoelectronics and Communication Conference (OECC 2008)/Australian Conference on Optical Fiber Technology (ACOFT 2008)*, Sydney, Australia, July 10, 2008
- ⑥ S.K. Varshney, K. Saitoh, R.K. Sinha, and M. Koshiba, Theoretical design of multi-core photonic crystal fiber based  $1 \times 4$  power splitters, *Optoelectronics and Communication Conference (OECC 2008)/ Australian Conference on Optical Fiber Technology (ACOFT 2008)*, Sydney, Australia, July 9, 2008
- ⑦ K. Saitoh, K. Kakihara, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Nonlinear enhancement and dispersion management in bismuth microstructured fibers with a filled slot defect, *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2008)*, San Jose, California, USA, May 6, 2008
- ⑧ S.K. Varshney, K. Saitoh, and M. Koshiba, Evaluation of induced form-birefringence and PMD in dispersion-compensating hole-assisted fibers, *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008)*, San Diego, California, USA, Feb. 28, 2008
- ⑨ T. Murao, K. Saitoh, and M. Koshiba, Structural optimization of ultimate low loss air-guiding photonic bandgap fibers, *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC 2008)*, San Diego, California, USA, Feb. 27, 2008
- ⑩ Y. Tsuchida, K. Saitoh, and M. Koshiba, Single-polarization photonic crystal fibers based on resonant coupling phenomenon, *IEEE/LEOS Winter Topicals Conference 2008*, Sorrento, Italy, Jan. 15, 2008
- ⑪ K. Saitoh, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Broadband dispersion compensating hole-assisted fibers, *33rd European Conference on Optical Communication (ECOC 2007)*, Berlin, Germany, Sept. 19, 2007
- ⑫ S.K. Varshney, K. Saitoh, N.J. Florous, and M. Koshiba, A simple and

- practical design approach to realize band-pass photonic crystal fiber filters, Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), Yokohama, Japan, July 11, 2007
- ⑬ N.J. Florous, K. Saitoh, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Fluidic sensors based on photonic crystal fiber gratings: An emerging technology for realizing ultra-low thermo-responsive sensing platforms, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications and Slow and Fast Light (IPNRA/SL 2007), Salt Lake City, USA, July 10, 2007
- ⑭ K. Saitoh, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Resonant coupling in photonic crystal fibers, Optoelectronics and Communications Conference and International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), Yokohama, Japan, July 10, 2007 (Invited)
- ⑮ S.K. Varshney, K. Sasaki, K. Saitoh, N.J. Florous, and M. Koshiba, 1.3  $\mu$  m photonic crystal fiber Raman laser, Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2007), Munich, Germany, June 20, 2007
- ⑯ N.J. Florous, K. Saitoh, S.K. Varshney, Y. Tsuchida, T. Murao, and M. Koshiba, Inline cryogenic temperature sensors based on photonic crystal fiber Bragg gratings in infiltrated with noble gases for harsh space applications, Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2007), Munich, Germany, June 18, 2007
- ⑰ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, All-fiber integrated assemblies based on the resonant tunneling effect in multi-core photonic band-gap fibers, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, May 8, 2007.
- ⑱ N.J. Florous, K. Saitoh, T. Murao, and M. Koshiba, Radiation dose enhancement in photonic crystal fiber

- Bragg gratings: Towards photo-ionization monitoring of irradiation sources in harsh nuclear power reactors, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, May 8, 2007
- ⑲ K. Saitoh, N.J. Florous, S.K. Varshney, and M. Koshiba, Tunable photonic crystal fiber couplers infiltrated with highly-thermo-responsive liquid crystal substances, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, May 8, 2007
- ⑳ S.K. Varshney, Y. Tsuchida, K. Sasaki, K. Saitoh, and M. Koshiba, Experimental demonstration of Raman gain efficiency and chromatic dispersion of hole-assisted fiber: Influence of bend, Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), Baltimore, USA, May 8, 2007

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小柴 正則 (KOSHIBA MASANORI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：40101521

### (2) 研究分担者

齊藤 晋聖 (SAITOH KUNIMASA)

北海道大学・大学院情報科学研究科・

准教授

研究者番号：20333627

### (3) 連携研究者

なし